

电火花加工装备国内外研究现状

Research Status of Electrical Discharge Machining Equipment

上海交通大学 顾琳



顾琳

上海交通大学机械与动力工程学院副教授, 博士生导师, 主要研究方向为特种加工、高速电弧放电加工技术及装备、微细加工技术及装备。

我国航空航天工业正处于核心技术攻坚的关键时期, 对新型动力系统及结构件性能提出了很高要求。在此背景下, 如高温合金、高强度钢、复合材料等多种性能优异的先进材料应运而生。为满足航空航天产品的独特性能要求, 很多材料的成分和组织非常特殊, 给加工带来了极大挑战^[1]。此外, 航空发动机热端部件上的冷却孔、叶盘类零部件的复杂流道等难加工特征也给传统制造技术提出了很大挑战^[2]。电火花加工(Electrical Discharge Machining,

精密化、微细化、智能化、绿色化和高效化是当前电火花加工技术的主要发展方向。随着电力电子技术、自动控制技术和创新设计理念的迅猛发展, 国内外电火花加工装备在低耗、高质量的精密电源、自适应控制、新型工作液系统、无损耗加工、床身热稳定与热变形修正、CAD/CAM与工艺集成、自动更换电极及人机友好等方面取得了长足的发展。

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.16.040

EDM)是利用工具和工件之间脉冲放电形成的等离子体的瞬时高温(可达数千甚至上万度)来蚀除材料的一种特种加工方法。这种以非接触方式利用热能来蚀除材料的特点使其具有加工时宏观作用力小, 加工能力不受工件材料强度、硬度等机械性能的限制及无宏观切削力等优点, 尤其适用于难加工材料和复杂形状工件的加工。此外, 相对其他精密加工设备而言, 电火花加工设备的价格较低, 但仍可获得很高的加工精度, 因此在航空、航天、汽车、电子、模具、医疗器械等行业得到了广泛应用^[3]。

根据主要用途, 可将当前国内市场的电火花加工机床分为多轴联动数控电火花成形加工机、多轴联动电火花精密小孔机、慢走丝电火花线切割机、微细电火花加工机、电火花小孔机、往复走丝电火花线切割机以及

为特殊用途定制的机床等^[4]。

三轴联动数控电火花成形加工机床

三轴联动数控电火花成形加工机床是技术最为成熟、市场份额最大的电火花成形加工设备, 在航空航天及模具行业得到广泛的应用。该类型机床通常配有专用数控系统, 部分产品可通过选配旋转轴(C轴)来实现四轴联动加工。目前航空航天领域具有较大深径比的槽与孔, 以及对表面质量要求较高的零部件大多采用此类型机床加工。当前国内市场上高端机型的主要国际厂商主要有瑞士GF阿奇夏米尔集团、日本的牧野(Makino)、沙迪克(Sodick)、三菱电机(Mitsubishi Electric)等。

瑞士GF阿奇夏米尔集团生产的FORM20/30系列成形机配备了GF

阿奇夏米尔的原装瑞士电源,凸显了在电源方面的技术优势。可加工最大尺寸 800mm×550mm×265mm、重量为 400kg 的工件。FORM3000 是该公司目前在市场上销售的超精密数控电火花成形机床(见图 1),搭载了具有 iQ 智能加工技术的电源模块,可在低电极损耗条件下实现高精度加工,最大工件尺寸为 1200mm×800mm×350mm,最大工件重量为 2000kg。该公司系列机床目前最优加工表面粗糙度为 0.1 μm。

日本牧野公司的三轴电火花成型机主要有 EDGE、EDAF、EDAC 等系列,其加工精度按顺序依次提高。其中 EDAF 系列采用高刚性构造,最大行程 450mm×350mm×350mm,定位精度达 ±1 μm,并有面向航空航天零部件加工的钛合金加工模块(见图 2)。

在电火花加工过程中,电极经常需要周期性的抬起或回退以加强冲液效果,较高的抬刀速度可以使加工状态明显改善。由于直线电机具有响应快、速度快、定位精度好的优势,被日本沙迪克公司应用于 AG 系列电火花成形机。

日本三菱电机 MITSUBISHI Electric 公司目前在中国市场销售的电火花成形机主流机型为 EV



图2 EDAF3成形机

Advance 系列,属于该公司的中高端产品。该系列机床配置高速低消耗 V 电源,并可选配混粉装置以实现大面积高表面质量加工(镜面加工)。

北京安德建奇数字设备有限公司开发的四轴全功能数控电火花成形机床 AF1300 配备了 4 刀叉自动电极交换装置,具有很高的自动化程度。机床特别提供了耐热高温合金、钛合金等特殊材料的工艺选择,可满足航空航天的相关加工需求。

此外,国内和台湾也有多家电火花成形机厂商生产三轴或四轴联动数控电火花机床,主要厂商有苏州中特(苏州电加工所)、北京迪蒙数控(北京电加工所)、苏州三光、东庆、北

京凝华、苏州宝玛、上海汉霸、泰州三星、泰州江州、四川深扬、杭州华方、上海大量等,它们各具特色,形成了百花齐放的格局。

五轴联动数控电火花成形加工机床

三轴或四轴联动加工的电火花成形机可以满足绝大多数模具生产的需要,也可适用于航空航天和电子等行业中精密接插件的加工,但是对于具有复杂型腔或流道曲面特征的零部件而言,其加工能力就有很大的局限性。譬如航空、航天发动机的叶盘类零件,就必须采用五轴联动的机床加工。而当前为了提高航天发动机的使用效率和寿命,带冠整体涡轮盘类零件正越来越多地被采用。此类零件目前主要加工手段为五轴联动电火花成形加工,并辅以专门设计的成形电极以特殊轨迹进行加工。现阶段,这种类型的电火花成形加工设备仍无法进口,因此对五轴甚至六轴联动电火花加工机床的国产化提出了迫切需求。近年来,国内主要电火花机床厂商在国家 04 专项“数控机床和基础装备”重大项目的支持下,以苏州电加工所、北京电加工所为代表的单位联合多所国内院校,经过一系列技术攻关,研制成功了五轴联动电火花加工机床,填补了国内空白,为我国航天航空制造业的发展提供了有力支持。

苏州电加工所推出的五轴数控电火花成形机(图 3)采用了自行设计的数控直驱式 C 轴和外置式旋转分度工作台,可以对包括钛合金、高温合金等特殊材料在内的所有导电材料零件进行三维复杂形面进行高效、精密加工。

北京迪蒙数控技术有限责任公司研制的 N850 五轴联动精密数控电火花成形机采用了电火花加工数控系统与精度补偿技术、多种难加工材料电火花加工高效脉冲电源技术、自



图1 FROM3000精密成形机

行设计的专用精密数控转轴(A轴、C轴)等先进技术,实现了钛基、镍基高温合金材质涡轮盘的加工。

上海汉霸与上海交通大学联合开发了国内首台六轴联动数控电火花加工机床,并参加了2014上海国际机床展和2015年中国国际工业博览会(图4)。该机床突破了一系列关键技术,并开发了配套的CAD/CAM软件和加工工艺,为制造闭式整体涡轮叶盘提供了一套全面技术解决方案。

多轴联动数控电火花小孔加工精密机床

在航空航天零部件中,有大量的微小孔需要加工。这些孔通常深径比大于5甚至达10以上,具有深孔特征,并且不能留有毛刺。这给传统加工提出了巨大的挑战。由于电火花加工属于热蚀除加工,不会形成毛刺,因此相应的多轴联动数控精密电



图3 苏州电加工所的五轴数控电火花成形机D7132



图4 国产六轴电火花成形机及涡轮盘加工

火花小孔机也应运而生。电火花小孔机的生产企业很多,大多数精密小孔机的加工对象是喷嘴类零件,其他产品属于普通穿孔机,这里不再一一列举。

GF阿奇夏米尔公司推出的Drill300是一款专门针对航空航天冷却孔的加工专用机床,具有X/Z/Z/W四轴,可提供高温合金、钛合金、硬质合金及钢等多种材料的EDM钻孔工艺。

苏州电加工所还专门推出了航空航天专用小孔机SE WK007,可用于航空发动机、燃气轮机等特殊材料零部件空间位置复杂分布的群小工的高速、高精度加工,可加工孔径范围一般在 $\phi 0.3\sim 3\text{ mm}$,深径比最大可达300:1。

微细电火花加工机床

航空航天产品的小型化和微型化产生了对具有微尺度特征合金类零部件的加工需求,尽管现在精密电加工机床可以实现部分微细特征的加工,但加工尺度为数微米到数十微米特征时需要更低的脉冲能量(小于 10^{-6} J),对机床的运动精度要求更高($\mu\text{ m}$ 级),而且需要具备电极在线制备、修整的功能以消除电极的安装定位误差影响。这就意味着必须采用专用的微细电火花机床。瑞士Sarix是以微细电火花机床为主要产品的机床商,其推出的SX-100、SX-200等系列机床具有3D电火花加工能力,并有铣削加工模块可选;可加工最小直径0.01mm的微孔,最优表面粗糙度可达 $0.05\ \mu\text{ m}$,定位精度为 $\pm 2\ \mu\text{ m}$ 。

目前,国内厂商尚未推出商业化的微细电火花加工机床,微细电火花加工机床一般由高校、研究所根据需求自主研发。如哈尔滨工业大学、上海交通大学等科研机构均研发成功多轴联动微细电火花机床并在航空航天企业的生产中得到了成功应用。

电加工专用机床

绿色、高效是当前制造技术所共同面对的发展目标,国内电加工装备研究机构也为航空航天制造业推出了一系列高效专机。

苏州所、东庆、汉霸等多个厂商均开发了双头电火花加工成形机,可用于大型燃机叶轮的高效加工。

蜂窝环是由薄金属片压制的、蜂窝状的复杂构件,在航空发动机中起关键的密封作用,采用机械切削会引起变形而无法加工。苏州中特公司为飞机发动机制造企业研制了环形件内、外圆蜂窝环电火花磨削专用设备,加工质量和精度达到了用户要求(图5)。



图5 蜂窝环数控高效电火花磨削专用设备

发动机的机匣、盘件、叶片等通常由如钛合金、高温耐热合金等难切削材料制成,并且在加工中往往需要去除较大的余量,这是发动机制造中的“瓶颈”,对当前制造技术提出了严峻挑战。数控高效放电(电弧)加工技术为解决此类问题提供了有效途径。目前,国内外已有多家研究机构开展了相关的研究。美国GE公司已将电弧加工应用于实际型号的生产中^[5]。国内的苏州电加工所推出了可进行四轴联动三维曲面加工的高效放电铣削加工机床,采用简单的铜管或钢管作电极,在电极和工件

间施加脉冲电源执行铣加工,效率远高于传统的电火花加工^[6]。此外,国内的哈尔滨工业大学^[7]、石油大学^[8]等院校也开展了电弧放电铣的研究。上海交通大学发明了基于“流体动力断弧”的高速电弧放电加工技术,不仅可实现前面所述的铣削加工,而且可实现成形电极的“沉入式”加工,在具有大栅距特征的叶盘类零件加工方面具有良好的应用前景^[9]。

数控慢走丝电火花线切割机床

数控慢走丝电火花线切割机床是具有较高效率、加工精度和表面质量的精密加工设备,在航空航天、模具、医疗器械等行业应用广泛。近年来,在国家重点项目支持下,国内慢走丝厂商的技术水平得到长足发展,装备水平和工艺能力显著提升,打破了国外的市场垄断,其中多项指标已达国际水平。

CUT20/CUT200/CUT2000 是瑞士 GF 阿奇夏米尔集团推出的系列慢走丝线切割机,其中 CUT2000 是超精密机型。该机型装有第三代自动双线切换装置,可在一台机床上用不同直径的电极丝进行粗、精切割加工,精加工可采用的最小丝径为 0.03mm;定位精度为亚微米量级,并可获得 0.04 μm 的纳米级表面粗糙度。

牧野公司的慢走丝线切割机床型号较多,有 U/UPJ/UPH/W 等多个系列,主要面向中小型模具的加工。其中 UPV3/UPV5 使用 SPGII 电源,采用油基工作液,可以硬质合金和金刚石(PCD)刀片,最低表面粗糙度可达 0.022 μm。

日本三菱电机的慢走丝机床为 FA-S 系列,采用高速 V 电源,用直径 0.25mm 的电极丝可达 360mm²/min 的高效加工。

此外,国外慢走丝机床还有沙迪克的 AQ 系列产品,台湾地区的庆鸿、

精呈等也有相应的慢走丝机床销售。外资品牌装备在精密加工电源、变厚度切割的自适应控制、自动穿丝系统及防断丝、机床变形控制等方面具有一定的优势。

国内目前推出慢走丝线切割机床的厂商有苏州三光、苏州电加工所和北京安德数控 3 家。

苏州三光公司的慢走丝电火花线切割机床主要有冲水型(DK7632)以及浸水机 2 种,具有自动穿丝功能。浸水型采用全闭环控制,加入了智能电源模块,在获得低粗糙度的同时可保证高生产率和高精度,并可大大减少耗电量。

北京安德数控推出的 AW310T 是一种带自动穿丝装置的恒张力运丝机构、六轴数控坐标轴控制、纳秒级无电解脉冲电源、有机床温度场变化所带来精度影响的补偿控制机制的精密数控慢走丝线切割机床,具有多种材料及厚度的加工工艺参数库和智能专家系统,可进行航空航天发动机叶片、涡轮盘等零部件的加工(见图 6)。

结束语

精密化、微细化、智能化、绿色化和高效化是当前电火花加工技术的主要发展方向。随着电力电子技术、自动控制技术和创新设计理念的迅猛发展,国内外的电火花加工装备在低耗、高质量的精密电源、自适应控

制、新型工作液系统、无损耗加工、床身热稳定与热变形修正、CAD/CAM 与工艺集成、自动更换电极及人机友好等方面取得了长足的发展。尤其可喜的是,在国家重大专项、国家 863 项目等一系列重大、重点项目的支持下,国内的电火花加工设备的研制取得了可喜的成绩,一方面与国外先进厂商的差距日益缩小;另一方面发扬了自己的特色,尤其是在航空航天领域,为相关单位的生产提供了强有力的支持,收获了良好的用户口碑。

参考文献

- [1] 师昌绪,仲增埔.我国高温合金的发展与创新.金属学报,2010,46(11):1281-1288.
- [2] Fritz K, Andreas K, Drazen V, et al. Turbomachinery component manufacture by application of electrochemical, electro-physical and photonic processes. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2014, 63:703-726.
- [3] Abbas N M, Solomon D G, Bahari M F. A review on current research trends in electrical discharge machining (EDM). International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2007, 47:1214-1228.
- [4] CIMT2011 特种加工机床评述专家组.第十二届中国国际机床展览会特种加工机床评述.电加工与模具,2011,3:1-8.
- [5] Wei B, Trimmer A L, Luo Y, et al. Advancement in High Speed Electro-Erosion Processes for Machining Tough Metals. ISEM-16, Shanghai, 2010:193-196.
- [6] 叶军.数控高效放电铣加工技术.世界制造技术与装备市场,2009,5:45-49.
- [7] 霍希建.钛合金 ECDM 铣削工艺的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学.2010.
- [8] Wang F, Liu Y H, Zhang Y Z, et al. Compound machining of titanium alloy by super high speed EDM milling and arc machining. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(3):531-538.
- [9] Zhao W, Gu L, Xu H, et al. A Novel High Efficiency Electrical Erosion Process - Blasting Erosion Arc Machining. Procedia CIRP, 2013, 6: 622-626.



图6 AW310T慢走丝线切割机床

(责编 秦早)